

# ASMA KÖPRÜLERİN TİTREŞİMLERİNİN GPS İLE İZLENMESİ

H. Erdoğan<sup>1</sup>, E. Güla<sup>2</sup>, B. Akpınar<sup>2</sup>, E. Ata<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aksaray Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Aksaray, [hediye.erdogan@gmail.com](mailto:hediye.erdogan@gmail.com)

<sup>2</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, [egulal@yildiz.edu.tr](mailto:egulal@yildiz.edu.tr)

## ÖZET

*Bu çalışmada; Asya ve Avrupa kıtalarını birleştiren 1074 m ana açıklığa sahip Boğaziçi Köprüsü'nün tepkileri GPS ile ölçülmüştür. Ölçüler köprü tabliyesinde değişimin en çok gözlemlendiği orta noktada 0,2 saniye örnekleme periyodunda 45 dakika yapılmıştır. Ölçülerin analizi yapılmadan önce ölçülere yüksek geçişli filtreleme özelliği gösteren farklandırma işlemi yapılarak ölçülerde var olan gürültü, lineer tren bileşeni ve alçak frekanslar giderilmiştir. Daha sonra da ölçülerin Hızlı Fourier Dönüşümü(HFD) sonucu frekans ve genlik değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu tepki değerleri yapıya etkileyen anlık, ya da rasgele rüzgar kuvveti ve trafik yüküne bağlı değerlerdir. Son olarak da hesaplanan bu tepkilerin yapının üç boyutlu sonlu eleman modelinden hesaplanan modal titreşim frekansları ile uyumlu olup olmadıkları araştırılmıştır.*

Anahtar Sözcükler: Boğaziçi Köprüsü, GPS, Hızlı Fourier Dönüşümü, Güç Spektrumu, Frekans.

## ABSTRACT

### MONITORING OF VIBRATIONS OF SUSPENSION BRIDGES BY GPS

*In this study, responses of Bosphorus Bridge which connects the Asian and European continents and have 1074 m span had been observed by GPS on the middle point of the deck and 0.2 sec sampling rate during 45 minutes. Before the analysis of observations, noise, linear trend and low frequencies of observation had been eliminated with differencing procedure which have high pass filtering characteristics. And then frequency and amplitude quantities of observations had been determined in the result of Fast Fourier Transformation (FFT). These response quantities are dependent on real time or random wind and traffic load. Finally these responses had been compared with modal vibration frequencies which calculated from three dimensional finite elements model.*

Keywords: Bosphorus Bridge, GPS, Fast Fourier Transform, Power Spectrum, Frequency.

## 1. GİRİŞ

Ana açıklığı 1000 m'nin üzerindeki önemli asma köprülerin yapısal güvenliğinin kontrol edilmesi ve sürdürülmesi ile ilgili olarak son yıllarda çok sayıda araştırmalar yapılmıştır. Asma köprülerin trafik, rüzgar ve deprem yükü gibi dinamik yüklere karşı yeterli düzeyde güvenliğinin sağlanması, köprünün doğal frekansları, mode şekilleri ve sönüm oranları gibi dinamik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ile mümkündür. Bir yapının dinamik özelliklerinin belirlenmesinde modal analizi tekniğinden yararlanılmaktadır. Modal analizi analitik ve deneysel modal analizi olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır.

Analitik modal analizinde bir yapının dinamik özellikleri sönümsüz serbest titreşim eşitliğinin çözümü ile belirlenmektedir. Yapıların analitik modal analizi için sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılmaktadır (Dumanoğlu ve Adanur, 1998). Ancak, Sonlu elemanların başarılı bir şekilde uygulanabilmesi deneysel çalışmalara bağlıdır. Çünkü asma köprü gibi karmaşık yapıların modellerinin oluşturulmasında bazı basitleştirmeler ve varsayımlar yapılmaktadır. Ayrıca, gerçek yapının sonlu eleman modelindeki geometrisinde ve malzeme özelliklerinde de bazı belirsizlikler bulunmaktadır. Bu nedenle yapıların sonlu elemanlarla elde edilen modelinin doğruluğu deneysel olarak onaylanması gerekmektedir. Aksi takdirde analitik modal analizi sonuçlarının güvenilirliği tartışılmaktadır. Doğru bir sonlu eleman modeli elde edebilmek için sonlu eleman modelinin deneysel olarak gözlenmiş ölçümlerle kalibre edilmesi gerekmektedir.

Deneysel modal analizi ise yapının modal parametrelerini dinamik ölçümlere dayalı olarak tanımlamaktadır. Mühendislik yapılarının dinamik tepkileri yapıların bazı bölümlerine tesis edilen sensörlerle doğrudan ölçülebilmektedir. Bununla birlikte, işletmeye açık yapıların dinamik tepkilerinin ölçülmesi pahalı ve zordur. Yapılara etkileyen kuvvetleri ölçmek ise son derece güçtür.

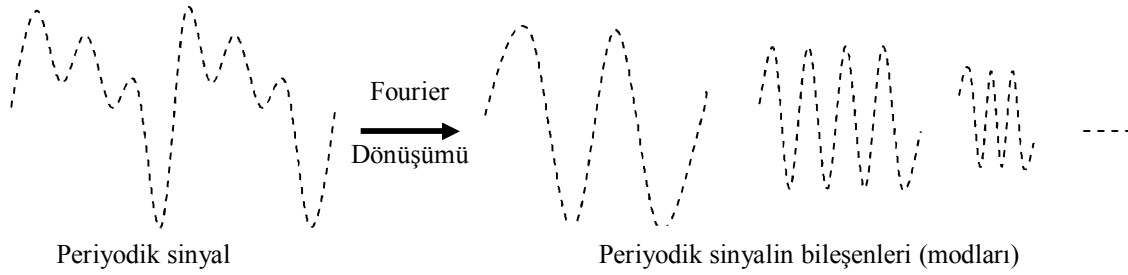
Köprüler trafik, rüzgar ya da deprem gibi doğal ya da çevresel yüklerin etkisi altında tepki göstermektedirler. Bu tepkilerin ölçülmesi sonucu, köprülerin titreşimleri belirlenebilmektedir. Bu tür ölçümlerin en büyük avantajı köprüde titreşim oluşturabilmesi için herhangi bir donanıma ihtiyaç duyulmaması nedeniyle pahalı olmaması ve işletmeye açık

iken ölçümlerin yapılabilmesidir. Bu yüzden, trafik, rüzgar ve deprem gibi yükler altında yapı titreşimlerinin GPS ve örnekleme frekansı çok daha yüksek accelerometer gibi aletlerle izlenmesi üzerine, örneğin; Lovse vd., (1995), Roberts vd., (1999), Roberts vd., (2000), Roberts vd., (2001), Radovanovic ve F.Teskey (2001); Wieser ve Brunner (2002) ve Cheng vd., (2002), Roberts vd., (2004) tarafından yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır.

Bu çalışmada, Boğaziçi Köprüsü tabliyesinin kuzey ve güney yönlerinin orta noktasının trafik ve rüzgar yükü etkisi altındaki hareketleri GPS ile ölçülmüştür. Köprü frekansları frekans bölgesinde yapılan güç spektrumu yardımıyla ölçülerden hesaplanmıştır. Ölçümlerden hesaplanan frekanslar 0–1.5Hz aralığındadır. Ayrıca, köprünün sonlu elemanlar modelinden hesaplanan frekansları da aynı aralık içerisinde. Her iki yöntemle hesaplanan frekansların uyumlu olduğu yapılan araştırmalar sonucu tespit edilmiştir.

## 2. HIZLI FOURIER DÖNÜŞÜMÜ

Fonksiyonlar kendilerini oluşturan sinüs veya kosinüs gibi periyodik fonksiyonlarla ifade edilebilmektedirler. Bir fonksiyonun kendisini oluşturan birçok sayıda alt fonksiyonlarla ifade edilebilmesi matematiksel olarak fonksiyonların kullanılabilirliğini arttırmıştır. 19. yüzyılda Fransız matematikçisi Joseph Fourier herhangi bir periyodik fonksiyonun sınırsız sayıda karmaşık üstel periyodik fonksiyonun toplamıyla ifade edebileceğini göstermiştir. Şekil (1)'de periyodik bir sinyalin frekans dönüşümü ile elde edilen sinüs bileşenleri gösterilmiştir (Bayazıt, 1996).



Şekil 1: Periyodik bir sinyalin Fourier Dönüşümü (Bayazıt, 1996)

Herhangi bir sinyali  $x(t)$  şeklinde zamana bağlı bir fonksiyon olarak gösterecek olursak bu fonksiyonun değişik kompleks üstel fonksiyonlar şeklinde göstermek için bu fonksiyonun üstel fonksiyonlarla skaler olarak çarpılıp zaman aralığı boyunca toplanması gerekir. Aşağıdaki bağıntılar sırasıyla Fourier ve Ters Fourier Dönüşümlerini ifade etmektedir (Polikar, 1996; Çankaya ve Vatansver, 2002).

$$X_s(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-2j\pi ft} dt \quad (1)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_s(f) \cdot e^{2j\pi ft} df \quad (2)$$

Bağıntılardaki  $t$ , zamanı,  $f$  ise frekansı ifade etmektedir. Burada  $e^{2j\pi ft}$  karmaşık ve periyodik üstel fonksiyonu ifade etmektedir.  $X_s(f)$  ise  $x(t)$  sinyalinin Fourier Dönüşümü'dür. Sinyalin yeniden elde edilmesi için frekans katsayıları belirlenen üstel fonksiyonlarla katsayıların çarpılıp zaman aralığı boyunca toplanması gerekmektedir. Böylece farklı frekanslardaki periyodik fonksiyonlar toplanarak sinyal yeniden oluşturulmaktadır (Bayazıt, 1996; Çankaya ve Vatansver, 2002).

Daha sonra Fourier'in fikirleri genelleştirilerek periyodik olmayan fonksiyonlarında bu şekilde ifade edilebileceği benimsenmiştir. Dr. Gabor tarafından ortaya atılan Gabor Dönüşümü, pencere fonksiyonu olarak tanımlanan bir sabit fonksiyonun zamanda ötelenmesi ile taranan herhangi bir sinyalin Fourier Dönüşümü (FD) alınarak, bölgesel frekans analizinin yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu durumda, pencerelenmiş sinyalin Fourier Dönüşümü, işaretin frekans bileşenleri yanında zaman bilgisini de içermektedir. Dönüşümde kullanılan pencere fonksiyonu, zaman ve frekans bölgelerinde (domain) sınırlı olan Gaussian fonksiyonudur. 1965'de ortaya atılan, yeni bir algoritmayla Gabor Dönüşümü, değişik pencere fonksiyonlarının kullanıldığı Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD) olarak genişletilmiştir (Korürek, 2000). KSFD dönüşümünü sağlayan bağıntı aşağıdaki şekilde verilmiştir (Misiti vd., 1997).

$$KSFD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) \cdot w^*(t - \tau)] e^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

Burada;  $x(t)$  sinyali,  $w(t)$  pencere fonksiyonu, \* karmaşık eşleniği,  $\tau$  zamanda ötelenmedir. KSFD, bir pencere fonksiyonuyla çarpılan sinyalin FD'nden oluşmaktadır. Her  $t$  ve  $f$  için yeni bir KSFD katsayı takımı hesaplanmaktadır. Bu şekilde FD, sadece frekansın bir fonksiyonu iken KSFD, hem frekansın, hem de zamanın bir fonksiyonudur (Çankaya ve Vatansver, 2002).

Sayısal sinyal işleminin pratik uygulamalarının çoğunda, bilgisayar sonsuz  $x(n)$  dizisinin elemanlarını saklayamaz ve sürekli  $w$  frekansının değerlendirilmesi olanaksızdır. Ayrıca teorik olarak tanımlanan bazı serilerin aksine gerçek serilerin Fourier Dönüşümü'leri hesaplanamamaktadır. Bu nedenle sayısal sinyaller için Fourier dönüşümünün kullanılması uygun olmamaktadır. Nuzunluğunda, (sonlu) bir  $x(t)$  ayrık sinyal için "Ayrık Fourier Dönüşümü" (AFD),

$$\begin{cases} X_s(f) = \sum_{t=0}^{N-1} x(t) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}ft} \\ x(t) = \frac{1}{N} \sum_{f=0}^{N-1} X_s(f) \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}ft} \end{cases} \quad (4)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. AFD'nin doğrudan hesaplanmasında her bir  $X_s(f)$  değeri için  $N$  karmaşık çarpma ve  $N-1$  karmaşık toplama işlemi kullanılmaktadır. Bu durumda  $N$  adet AFD değeri hesaplanırken,  $N^2$  çarpma ve  $N(N-1)$  toplama işlemi yapılmaktadır (Allen ve Mills, 2004; Çankaya ve Vatansver, 2002).

AFD doğasındaki periyodiklik nedeniyle bir sinyalin  $N$ -noktalı AFD alındığında işaretin  $N$  periyodu ile periyodikmiş gibi işlem görmektedir. Bu nedenle, AFD hesabı, en az sinyalin örnek sayısı kadar ayrık frekans değerinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. AFD sinyalin örnek sayısından daha az sayıda ayrık frekans değerinde hesaplandığında, sinyalin frekans spektrumunun seyrek örnekleme nedeniyle zamanda örtüşme (aliasing) meydana gelmektedir. Bu durumda zaman örtüşmesinden dolayı işaret değerleri Ters-AFD ile geri oluşturulamamaktadır. AFD hesabındaki  $N$  değeri sinyalin örnek sayısından fazla olabilir ve bu durumda işaretin sonuna sıfır değerlerinin eklenmesi ile sinyalin uzunluğu  $N$  ye çıkarılabilmektedir (Ertürk, 2004)

AFD hesaplamasında etkin ve günümüzde kullanılan yaklaşım HFD algoritmalarıdır. HFD (Fast Fourier Transform-FFT) algoritması; AFD'den farklı değildir. AFD'nin hesaplanması için etkili ve mükemmel bir algoritmadır. AFD'nin sayısal sinyal işleme alanında spektrum analizi ve korelasyon gibi işlemlerin yapılmasında önemli rol oynamasının nedeni HFD algoritmalarından kaynaklanmaktadır (Bergland, 1969, Bayazıt, 1996).

Bir sinyalin frekans spektrumunun hesapsal yöntemlerle elde edilmesi için  $2\pi$  ile periyodik olan ayrık-zamanlı frekansın bir periyodunun dikkate alınması yeterli olmaktadır. Ayrık-zamanlı frekans spektrumunun  $2\pi$  lik temel periyodunda  $N$  adet eşit aralıklı frekans değeri

$$\omega = \frac{2\pi}{N} k, \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (5)$$

şeklinde dir. Burada  $k$  tamsayısı  $2\pi$  lik temel frekans bandındaki ayrık frekans değerlerini belirtmektedir ve frekans endeksi olarak adlandırılmaktadır. Fourier dönüşümü için  $N$  adet ayrık frekans değeri için hesaplandığından,  $k=0,1,\dots,N-1$ , toplam  $N$  adet karmaşık Fourier Dönüşüm değeri  $X_s(f)$  elde edilmektedir. Bir sinyalin frekans spektrumu için sinyalin genlik, faz ve güç spektrumları HFD sonucu elde edilen karmaşık sayılardan kolayca belirlenebilmektedir (Ertürk, 2004).

### 3. BOĞAZIÇI KÖPRÜSÜ'NÜN TANIMI

20. yüzyılın ikinci yarısında İstanbul'un hızla gelişmesi ve Asya-Avrupa arasındaki trafiğin artması Boğaz'a köprü yapılmasını zorunlu hale getirmiştir. Boğaziçi Köprüsü'nün yapımına 1970 yılında başlanmış ve 1973 yılında da tamamlanarak hizmete açılmıştır. Boğaziçi Köprüsü, 1074 m ana açıklıklı, sırasıyla Avrupa ve Asya yakalarında olmak üzere 231 m ve 255 m kenar açıklıklı, narin kuleli ve eğik askılı modern bir asma köprüdür. Köprü kuleleri çelik kutu kesitli olup 165 m yüksekliğindedir. Köprü 6 şeritli bir karayolu trafiğini taşıyacak şekilde projelendirilmiş olup iki tarafta yaya yolu düzenlenmiştir. Trafik yükü olarak ilgili İngiliz yük standardının verdiği değerler %10 artırılarak alınmış ve 180 tonluk özel taşıt yükü de gözetilmiştir. Rüzgar yükü için maksimum rüzgar hızı 45 m/sn alınmıştır. Ayrıca İstanbul'un deprem bölgesinde olduğu düşünülerek köprü, temel zemin ivmesi yatayda 0,1 g'lik ivmesine dayanacak şekilde hesaplanmıştır. Düşey için ise 0,05 g olarak hesaplanmıştır.

#### 4. YAPI HAREKETLERİNİN BELİRLENMESİNDE ÖRNEKLEME FREKANSININ SEÇİMİ

Mühendislik yapılarındaki sürekli değişimlerin ayırık-zamanlı ölçümlerle belirlenmesi için ölçme işlemlerine başlamadan önce, ilk olarak ölçümede kullanılacak aletlerin örnekleme frekanslarının belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle de obje noktalarında yapılacak ölçmelerden elde edilen ölçülerin izlenen yapının hareketini ortaya koyacak nitelikte olması gerekmektedir. Bunun için hem ölçümede kullanılacak aletin örnekleme frekansı hem de izlenen yapının maksimum frekansının bilinmesi gerekmektedir. Nyquist teoremine göre, aletin örnekleme frekansı  $f_a$ , izlenen yapının maksimum frekansının  $f_m$  iki katına eşit ya da büyük ( $f_a \geq 2 f_m$ ) olması gerekmektedir. Boğaziçi Köprüsü'nün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile hesaplanan düşey doğrultudaki doğal frekansları Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'e göre, köprünün maksimum doğal frekansı 1,189 Hz'dir (15. mod sayısı). Nyquist teoremine göre karmaşık bir yapı olan Boğaziçi Köprüsü'nün hareketlerini tanımlayacak örnekleme frekansının en az 2,378 Hz olması gerekmektedir.

Tablo 1: Boğaziçi Köprüsü'nün ilk 15 moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri (Dumanoglu ve Severn, 1985)

| Mod No       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Periyot (s)  | 7,87  | 6,05  | 4,42  | 3,47  | 2,64  | 2,16  | 1,76  | 1,75  | 1,48  | 1,27  | 1,10  | 0,96  | 0,95  | 0,94  | 0,84  |
| Frekans (Hz) | 0,127 | 0,165 | 0,226 | 0,288 | 0,378 | 0,463 | 0,570 | 0,573 | 0,677 | 0,788 | 0,913 | 1,046 | 1,058 | 1,062 | 1,189 |

#### 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Boğaziçi Köprüsü'nün tabliye orta kesiminin hem kuzey hem de güney tarafının yanal, boylamasına ve düşey yönlerdeki davranışları 15.06.2005 tarihinde trafiğin yoğun olduğu 11:30 -12:30 saatleri arasında GPS ile ölçülmüştür. Ölçüler 0,2 saniye örnekleme aralığında zaman serisi niteliğinde toplanmıştır. Ölçümler için öngörülen 5Hz'lik örnekleme frekansının (örnekleme aralığı 0,2 saniye) Boğaziçi Köprüsü'nün bütün mod şekilleri ve frekanslarını belirlemede yeterli olacağı Bölüm 4'de ifade edilen bilgiler doğrultusunda karar verilmiştir.

Köprünün tabliye orta noktasındaki 22 (güney) ve 23 (kuzey) numaralı obje noktalarında (Şekil 1) eş zamanlı olarak gerçekleştirilen ölçümler sırasında sıcaklık 23°C, rüzgar hızı N yönünde 4m/sn olarak ölçülmüştür. Referans noktası (P6) ise obje noktalarından yaklaşık bir km uzaklıkta deniz seviyesinden 66 m yükseklikteki bir tepe üzerinde pilye şeklinde tesis edilmiştir.



Şekil 1: Boğaziçi Köprüsü, referans noktası (P6) ve obje noktaları (22-23)

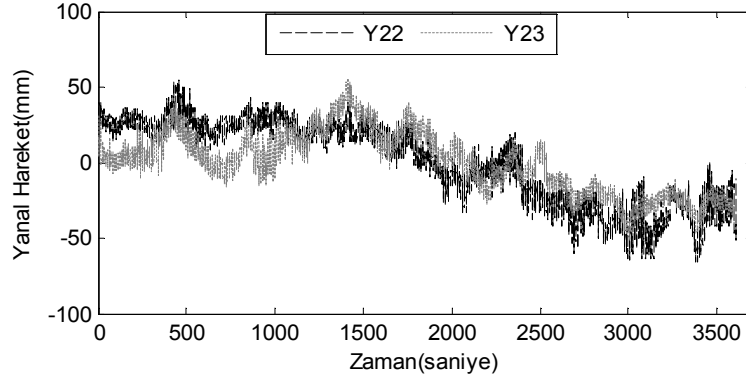
Boğaziçi Köprüsü'nün rüzgar kuvveti ve trafik yükü altındaki hareketlerinin grafikleri Şekil (2), Şekil (3) ve Şekil (4)'de verilmiştir. Grafiklerde tabliye orta noktasının hem güney (22) hem de kuzey (23) tarafındaki noktalarının yanal, boylamasına ve düşey hareketleri görülmektedir. Bu değişimler ölçülerin ortalama değerden farkları alınarak belirlenmiştir. Ortalama değer ise ölçülerin ortalaması alınarak hesaplanmış ve tabliye için ortalama denge konumu olarak öngörülmüştür. Ölçülerin bu denge konumundan olan farkları tabliyenin yük etkisi altında gösterdiği hareketleri

olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca, Tablo 2’de tabliyenin denge konumundan olan hareketlerinin maksimum değerleri verilmiştir. Buradaki maksimum değerler tabliyenin denge konumunun üstünde (+) ve altındaki (-) değişimleridir.

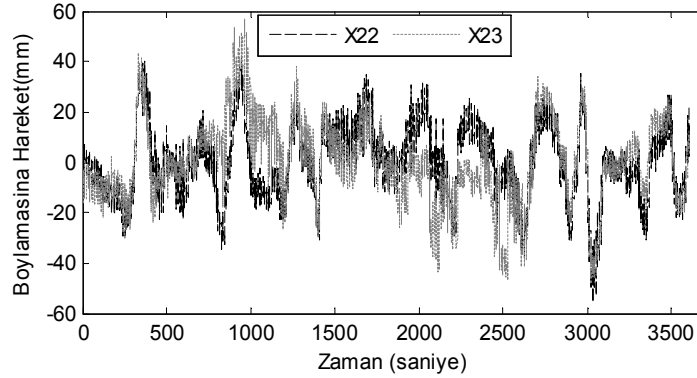
Tablo 2: Tabliye orta noktasının ortalama değerin altında ve üstündeki maksimum hareketleri

| N.NO | Y <sub>(mm)</sub> |       | X <sub>(mm)</sub> |       | H <sub>(mm)</sub> |        |
|------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|--------|
|      | +Max.             | -Max. | +Max.             | -Max. | +Max.             | -Max.  |
| 22   | 54,3              | -65,6 | 41,4              | -55,6 | 169,4             | -219,6 |
| 23   | 55,8              | -51,2 | 57,3              | -46,7 | 164,5             | -194,5 |

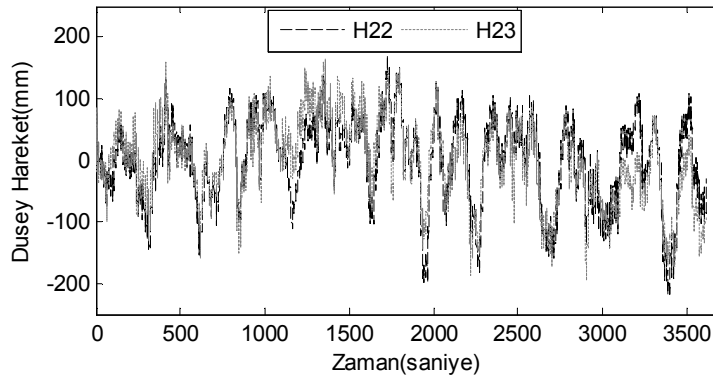
Tablo (2), Şekil (2), Şekil (3) ve Şekil (4) incelendiğinde tabliyenin kuzey ve güney tarafının yanal, boylamasına ve düşey hareketlerinin aynı yönlere ve yaklaşık aynı büyüklükte olduğu görülmektedir. Tabliyenin her iki tarafında da düşey yöndeki değişimler beklenildiği gibi cm düzeyinde olup değişimler büyük bir benzerlik göstermektedir.



Şekil 2: Boğaziçi Köprüsü'nün tabliye orta noktasının kuzey ve güney tarafının yanal hareketleri



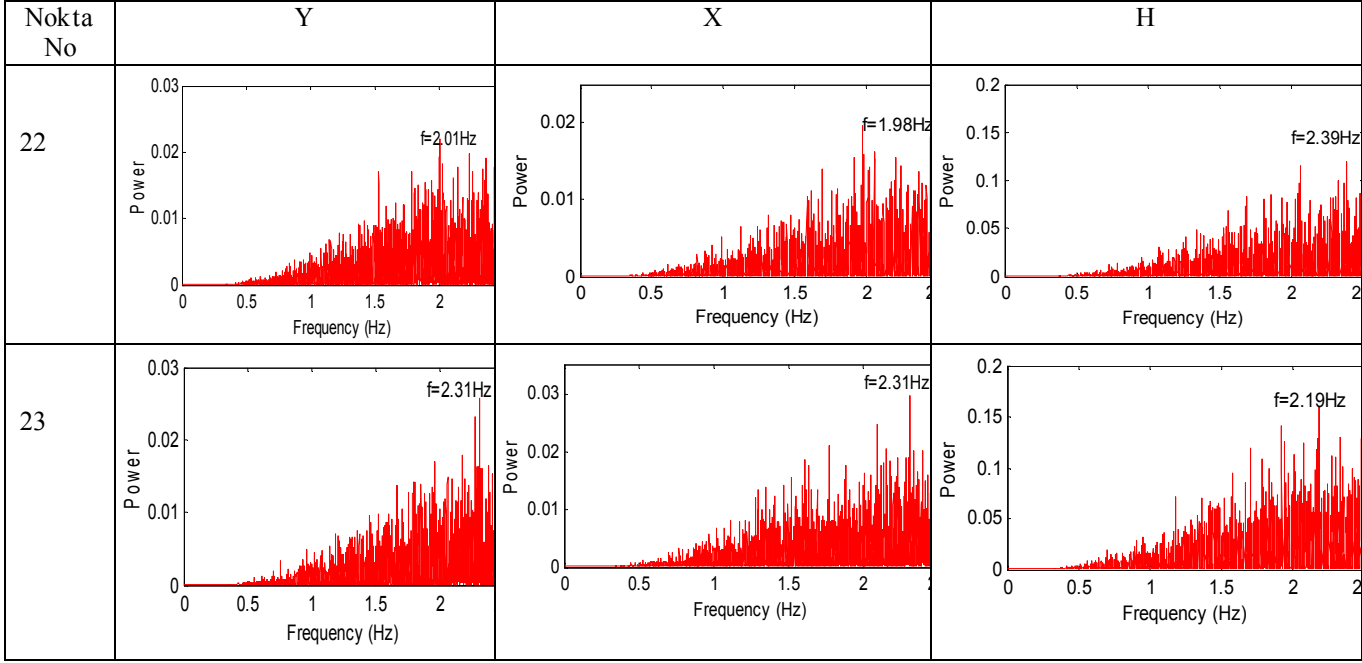
Şekil 3: Boğaziçi Köprüsü'nün tabliye orta noktasının kuzey ve güney tarafının boylamasına hareketleri



Şekil 4: Boğaziçi Köprüsü'nün tabliye orta noktasının kuzey ve güney tarafının düşey hareketleri

Boğaziçi Köprüsü'ne etkiyen yüklerde oluşan rasgele ve ani değişimler (rüzgarın yön değişimi, araç hızlarının farklı olması ve fren yapmaları) sonucu, tabliyede lokal hareketler oluşabilmektedir. Bu tür değişimleri uzun zamanlı değişimler üzerinde yer alan yüksek frekanslar olarak ele alabiliriz. Yapılarda oluşan bu tür hareketleri belirlemek için yapı hareketlerini temsil eden zaman serilerinde birinci dereceden farklandırma yapılmıştır. Böylece seriye bir çeşit

yüksek-geçişli filtreleme uygulanarak hem serideki alçak-frekanslar bastırılarak yüksek frekanslar belirlenmiş hem de seride yer alan nois ve trend bileşenleri de giderilmiştir. Daha sonra farkı alınan serinin FFT ile güç spektrumları hesaplanmıştır. Tabliye üzerindeki 22 ve 23 numaralı noktaların Şekil 5'deki spektrum grafiğinde yatay eksenin yapının belirgin frekanslarının ortaya çıktığı Hz birimindeki frekans eksenini, dikey eksen ise yapının yük etkisine karşılık tepkisinin büyüklüğünü gösteren güç eksenidir. Hesaplanan tepki büyüklüğünün gücü her bir frekans değeri ile eşleştirmek suretiyle, yapının tepki büyüklüklerinin frekans değerleri belirlenmiştir. Tabliyenin yanal, boylamasına ve dikey yönlerdeki frekans tepkileri her iki nokta için de benzer elde edilmiştir (ortalama 2,20Hz). Özellikle köprünün tabliye kesiminin her üç yönde de 0-0,5 Hz aralığında frekans olarak tepki göstermediği görülmüştür. Tabliyenin 0,5-2,5 Hz frekans aralığında belirgin tepkiler gösterdiği de görülmektedir. Bu tepki değerleri Dumanoglu ve Severn (1985) tarafından Boğaziçi Köprüsü'nün hesaplanan doğal frekanslarını içermektedir. Boğaziçi Köprüsü'nün ilk 15 mod için doğal frekansları Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi köprünün ilk 15 doğal frekans değeri 0,127 Hz ile 1.189 Hz aralığında yer almaktadır.



Şekil 5: Boğaziçi Köprüsü'nün tabliye orta noktasının güç spektrumları

Ancak, yapının ölçülerden hesaplanan frekans aralığı bu doğal frekans aralığından büyük elde edilmiştir. Bunun sebebi ise, doğal frekans ve periyotlar yapının sadece kütle matrisi (yani kütlesi) ve rijitlik matrisi (yani malzeme özelliklerinden oluşan matris) dikkate alınarak sönümsüz serbest titreşimi sonucu elde edilmesidir. Dolayısıyla bir yapının doğal frekanslarının hesabı, yapıya etkiyen diğer yüklerden (rüzgar, deprem, araç yükü vb) bağımsızdır. Ancak, Dumanoglu ve Severn (1989)'da rüzgar kuvveti ve trafik yükü nedeniyle meydana gelen geçici titreşimlerin ölçümleri sonucunda asma köprülerin mod şekilleri ve frekanslarının elde edilebileceğini göstermişler ve örnek olarak da Boğaziçi ve Humber Köprülerini seçmişlerdir.

## 6. SONUÇLAR

Asma köprüler farklı büyüklükte ve yönlerde etkiyen sıcaklık değişimleri, trafik yükü, yaya yükü ve rüzgar kuvveti gibi büyüklüklerin etkisi altında kalırlar. Asma köprülerin anlık ya da yüksek frekanslı bu tür yüklerle olan tepkilerinin şekil ve fonksiyonlarının belirlenebilmesi için uygun örnekleme frekansına ve doğruluğa sahip ölçüm donanımları ile ölçülmesi gerekmektedir.

Yapılardaki bu tür tepkilerin belirlenebilmesi için seçilen örnekleme frekansının yapının maksimum frekansının iki katına eşit ya da büyük olması gerekmektedir. Aksi takdirde yapının davranışı hakkında yeterli doğrulukta bilgiler elde edilemez ve herhangi bir tehlike durumunun farkına varılamaz. Ancak, seçilen örnekleme frekansının düşük olması yapılarda uzun zamanlı değişimlerin (sıcaklığın etkisinden kaynaklanan uzun zamanlı değişim) belirlenmesinde faydalı olabilir. Bunun için de ölçüm süresinin uzun zamanlı gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Ayrıca, yapıların farklı yük durumlarında sadece tepkilerinin ölçülmesi sonucu elde edilen zaman serilerinin analizi ile yapıların davranışları daha çok zaman ve frekans bölgesinde belirlenmekte ve elde edilen sonuçlar bizlere yapı davranışı hakkında ipuçları vermektedir. Bu tür yapıların farklı yük durumlarına olan tepkilerinin ayrıntılı bir

tanımlamasının yapılabilmesi için (malzeme özellikleri de) yapıya etkiyen büyüklüklerin ölçülmesi ve yapının matematiksel modelinin de elde edilmesi daha faydalı olacaktır.

## TEŞEKKÜR

İstanbul Boğaziçi Köprüsünde yapılan bu çalışma 25-05-03-02 YTUBAPK numaralı, “Asma Köprülerin İç ve Dış Yükler Altında Davranışlarının Sürekli Ölçü Yöntemleri ile İzlenmesi” konulu proje kapsamında yapılmıştır. Bu projeye destek veren Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne ve çalışmalar sırasında desteklerini esirgemeyen Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- Allen, R., L., Mills, D., W., 2004. *Signal Analysis, Time, Frequency, Scale, and Structure*, IEEE Press, USA, 2004.
- Bayazıt, M., 1996. *İnşaat Mühendisliğinde Olasılık Yöntemleri*, İTÜ, İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul
- Bergland, G. D., 1969. *A Guide Tour of the Fast Fourier Transform*, IEEE Spectrum, Vol. 6, pp. 41-55.
- Çankaya, İ., Vatansever, F., 2002. *Fourier ve Dalgacık Dönüşümünün Karşılaştırılması*, Sakarya Üniversitesi, FBE Dergisi, Sayı 6-3, sayfa 16-26.
- Cheng, P., John, W., Zheng, W., 2002. *Large Structure Health Dynamic Monitoring Using GPS Technology*, FIG XXII International Congress, Washington, D.C. USA.
- Dumanoğlu, A. A., Adanur, S., 1998. *Asma Köprülerin Dinamik Analizi*, İTÜ, İnşaat Fak., İstanbul.
- Dumanoğlu, A. A., Severn, R. T., 1985. *Asynchronous Seismic Analysis of Modern Suspension Bridges*, Part 1: Free Vibration, University of Bristol, Bristol, 1985.
- Dumanoğlu, A. A., Severn, R. T., 1989. *Seismic Response of Modern Suspension Bridges to Longitudinal and Lateral Ground Motion*, Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, Vol. 87, p. 73-86
- Ertürk, S., 2004. *Sayısal İşaret İşleme*, Kocaeli Üniversitesi, Birsen Yayınevi, İstanbul, sayfa 293.
- Korürek, M., 2000. *Biyomedikal Mühendisliğinde Özel Konular*, Ders Notları, İTÜ, İstanbul
- Lovse, J. W., Teskey, W. F., 1995. *Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology*, Journal of Surveying Engineering, Vo. 121(1), 16-22.
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim Y., Poggi J., 1997. *Wavelet Toolbox User's Guide the MathWorks*, Inc.
- Polikar, R., 1996. *Wavelet Tutorial*, Part I, Part II, Part III, Iowa State University, USA.
- Radovanovic, R. S., Teskey, W. F., 2001. *Dynamic Monitoring of Deformation Structure: GPS verses Robotic Tacheometry Systems*, The 10<sup>th</sup> FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, USA
- Roberts, G. W., Dodson, A.H., Ashkenozi, V. Brown, C. V, Karuna, R., 1999. *Comparison of GPS Measurements and Finite Element Modelling for the Deformation Measurements of the Humber Bridge*, Proc ION GPS, Nashville, USA.
- Roberts, G. W., Meng, X., Dodson, A., 2000. *Structural Dynamic and Deflection Monitoring Using Integrated GPS and Triaxial Accelerometer*, The 13<sup>th</sup> International technical Meeting of the satellite Division of the Institute of Navigation, USA.
- Roberts, G. W., Meng, X., Dodson, A. H., 2001. *The Use of Kinematic GPS and Triaxial Accelerometers to Monitor the Deflections of Large Bridges*, 10<sup>th</sup> International Symposium on Deformation Measurements, California, USA.
- Roberts, G. W., Cosser, E., Meng, X., Dodson, A., 2004. *High Frequency Deflection Monitoring of Bridges by GPS*, Journal of Global Positioning Systems, Vol. 3, No. 1-2, p. 226-231
- Wieser, A., Brunner, F. K., 2002. *Analysis of Bridges Deformations Using Continuous GPS measurements*, INGEO2002, 2<sup>nd</sup>Conference Surveying, Bratislava, pp. 45-52.